

ผลของอุณหภูมิทอรรีแฟกชันต่อสมบัติของซีเลื่อยไม้สน

EFFECT OF TORREFACTION TEMPERATURE ON PROPERTIES OF PINE SAWDUST

จารุณี เข้มพิลลา^{1*} และ ภูมินทร์ คงโต²

Jarunee Khempila^{1*}, and Pumin Kongto²

¹สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

²หลักสูตรเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

¹Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Mahasarakham University

²Energy Technology Program, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

*corresponding author e-mail: Jarunee.kh@rmu.ac.th

(Received: 28 September 2021; Revised: 20 November 2021; Accepted: 30 November 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการทอรรีแฟกชันซีเลื่อยไม้สนที่อุณหภูมิ 3 ระดับ นั่นคือ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในปฏิกิริยา 30 นาที โดยทำการศึกษาผลของความรุนแรงของอุณหภูมิต่อผลได้เชิงมวลและสมบัติด้านเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์แข็ง ได้แก่ องค์ประกอบแบบละเอียด ปริมาณความชื้นและเถ้า ค่าความร้อนสูง อัตราส่วนอะตอม รวมถึงวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน ผลการวิจัยพบว่า เมื่ออุณหภูมิทอรรีแฟกชันมีค่าสูงขึ้นจาก 250 เป็น 300 องศาเซลเซียส ผลได้เชิงมวลมีค่าลดลงจากร้อยละ 86.35 เป็น 62.63 ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 49.26 เป็น 60.01 และค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้นจาก 19.64 เป็น 24.54 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนและการลดลงของปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจน สัดส่วนอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) และไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) ของซีเลื่อยไม้สนทอรรีแฟกชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีค่าลดลงและมีสมบัติใกล้เคียงลิกไนต์ ดังนั้นซีเลื่อยไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันจึงเหมาะที่จะใช้ร่วมกับเชื้อเพลิงแข็งประเภทอื่นๆ รวมทั้งทดแทนถ่านหินในโรงไฟฟ้า

คำสำคัญ: ซีเลื่อยไม้สน ทอรรีแฟกชัน ถ่านชีวภาพ พลังงานชีวภาพ

In this research, the torrefaction of pine sawdust was investigated at 3 temperature levels, i.e., 250, 275 and 300 °C and reaction times of 30 min. The effect of the temperature severity on the mass yield and fuel properties of solid products was studied, namely, ultimate analysis, moisture and ash content, higher heating values, atomic ratio, including functional group analyses. The research found that as the temperature increased from 250 °C to 300 °C, the mass yield decreased from 86.35% to 62.63%, whereas the carbon content increased from 49.26% to 60.01% and the higher heating value increased from 19.64 to 24.54 MJ/kg. Due to the increase of carbon content and the decrease of oxygen and hydrogen content, the atomic oxygen-to-carbon (O/C) and hydrogen-to-carbon (H/C) ratios of pine sawdust torrefied at 300 °C decreased and possessed lignite-like qualities. Therefore, pine sawdust treated by torrefaction is suitable for use combined with other solid fuels, including replacing coal, in power plants.

บทนำ

ชีวมวลที่มีศักยภาพในประเทศไทยมีหลายชนิด ได้แก่ แกลบ ปีกไม้ยางพารา กะลาปาล์ม ทะลายปาล์มเปล่า ไม้ซิ่นสับ ใบอ้อย ยอดอ้อย ชังข้าวโพด เหง้ามัน และขี้เลื่อยซึ่งเป็นเศษวัสดุที่เหลือใช้จำนวนมากจากโรงเลื่อยไม้ เช่น ขี้เลื่อยจากไม้ยางพารา ไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถิน เป็นต้น (Energy789, 2021) หรือขี้เลื่อยจากโรงงานเฟอร์นิเจอร์ เช่น ขี้เลื่อยจากไม้สะเดา ไม้กฤษณา ไม้สน เป็นต้น ซึ่งพบการนำขี้เลื่อยไม้สนมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย อาทิเช่น ใช้เป็นวัสดุในการเพาะเห็ด ในภาคเกษตรกรรม ใช้เป็นวัสดุในการผลิตกระดานไม้อัดและนำมาใช้ประโยชน์ในด้านเชื้อเพลิง เนื่องจากจุดเด่นของขี้เลื่อยไม้สนที่มีค่าความร้อนสูงและอัตราการเผาไหม้ช้า (Lowden & Hull,

2013) จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ประโยชน์ด้านเชื้อเพลิง อีกทั้งมีข้อได้เปรียบด้านโครงสร้างของชีวมวลที่เป็นไม้จึงมีปริมาณของลิกนินมากกว่าชีวมวลประเภทที่ไม่ใช่ไม้ (Non-wooden) ปริมาณลิกนินในโครงสร้างพืชสลดคล้องกับค่าความร้อนเมื่อนำมาใช้ในรูปของเชื้อเพลิง (Telmo & Lousada, 2011) อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงชีวมวลมีข้อด้อยด้านสมบัติของการเป็นเชื้อเพลิง คือ มีความชื้นสูง ค่าความร้อนต่ำ ความหนาแน่นพลังงานต่ำ และเกิดการสลายตัวทางชีวภาพขณะจัดเก็บเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติด้านเชื้อเพลิงของชีวมวลให้สูงขึ้นเพื่อใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล

การปรับปรุงสมบัติหรือเปลี่ยนรูปชีวมวลด้วยความร้อนมีหลายกระบวนการ เช่น ไพโรไลซิส แก๊สซิฟิเคชัน และหนึ่งในนั้น คือ กระบวนการทอร์รีแฟกชัน ซึ่งเป็นกระบวนการปรับปรุงสมบัติและการเปลี่ยนรูปชีวมวลด้วยกระบวนการทางเคมีความร้อน โดยให้ความร้อนแก่ชีวมวลในสภาวะจำกัดออกซิเจน (อากาศ) ในช่วงอุณหภูมิ 200–300 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียสต่อนาที่ โดยใช้เวลาประมาณ 30–120 นาที ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จะอยู่ในรูปของแข็งหรืออาจเรียกว่า ถ่านชีวภาพ (Biochar) หรือชีวมวลทอร์รีไฟด์ (Torrefied biomass) ส่วนที่เหลือจะอยู่ในรูปของก๊าซและของเหลวบางส่วน สมบัติด้านเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชัน ได้แก่ ปริมาณความชื้นลดลง ค่าความร้อนสูงขึ้น ความหนาแน่นพลังงานสูงขึ้น และยังลดการย่อยสลายทางชีวภาพ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการทอร์รีแฟกชัน ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพแข็ง (Solid biofuel) จะมีสมบัติด้านเชื้อเพลิงสูงขึ้นใกล้เคียงกับถ่านหินเกรดต่ำ (Mamvura & Danha, 2020) ใช้ทดแทนหรือใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินได้ ช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบการนำเอาชีวมวลหลากหลายชนิดมาผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันเพื่อเพิ่มสมบัติทางฟิสิกส์เคมีดังงานวิจัยของ อรอริน และคณะ (2554) ได้ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการทอร์รีแฟกชันต่อกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้กระถินยักษ์ ต่อมา นคร (2554) ได้ศึกษาสมบัติทางเคมีความร้อนของวัสดุชีวมวลที่มีศักยภาพในการผลิตพลังงานโดยกระบวนการทอร์รีแฟกชันหรือการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศไนโตรเจนโดยตัวอย่างชีวมวลที่เลือกทำการศึกษา ได้แก่ พางข้าว ไม้กระถินยักษ์ ทะลายปาล์มเปล่า และผักตบชวา ผลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการทอร์รีแฟกชันได้รับการศึกษาโดย ญัฐพงษ์ (2558) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์ ในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้เปลือก/ซังข้าวโพดอัดเม็ด พางข้าวอัดเม็ด และใบอ้อยอัดเม็ด ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 175 200 225 และ 250 องศาเซลเซียส เวลา 30 60 90 และ 120 นาที นอกจากนี้ยังพบบางงานวิจัยที่ปรับปรุงแหล่งให้ความร้อนในกระบวนการโดยใช้เตาเผาแบบหมุน ซึ่งได้รับการศึกษาโดย ญัฐรัตน์ (2560) ทั้งนี้เพื่อศึกษาผลของกระบวนการทอร์รีแฟกชันต่อคุณสมบัติของชีวมวลทอร์รีไฟด์ 2 ชนิด คือ ซังข้าวโพด

และกลบ ด้านการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ สุรเศรษฐ์ และคณะ (2562) ได้ศึกษาคุณสมบัติการเผาไหม้ของเปลือกทุเรียน ทางปาล์ม และทางตาล ที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟกชัน นอกจากนี้ชีวมวลที่นำมาปรับปรุงคุณภาพเป็นเชื้อเพลิงแล้วยังพบการศึกษาของ นรารธร และยุวรัตน์ (2563) ที่ศึกษาการทอรรีแฟกชันเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากของเสียโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล โดยกากหม้อกรองจะถูกอัดเม็ดให้เป็นรูปทรงกระบอกและนำเข้าสู่กระบวนการทอรรีแฟกชันที่อุณหภูมิ 200–350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.5–2 ชั่วโมง จากการสำรวจงานวิจัยข้างต้น พบว่า ยังไม่มีการนำชี้อย่างมาศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงคุณภาพมากเท่าใดนัก

นอกจากชนิดของชีวมวลแล้ว ยังมีปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการทอรรีแฟกชัน นั่นคือ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีผู้ศึกษาการทอรรีไฟด์ชีวมวลที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ได้แก่ Zhang et al. (2016) ศึกษาการทอรรีไฟด์กลบที่อุณหภูมิ 220 250 และ 280 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ส่วน Sukiran et al. (2018) ศึกษาการทอรรีไฟด์ชิ้นไม้สับที่อุณหภูมิ 250 270 และ 290 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เช่นเดียวกัน ในขณะที่ Manouchehrinejad et al. (2020) ศึกษาการทอรรีไฟด์ทะลายปาล์มเปล่าที่อุณหภูมิ 225 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส ที่เวลาในกระบวนการแตกต่างกัน 3 ค่า คือ 20 40 และ 60 นาที ซึ่งพบว่าเวลาที่เหมาะสมสำหรับทะลายปาล์มเปล่า คือ 20 นาที และเมื่อไม่นานมานี้ Trouvé et al. (2020) ทำการศึกษาการทอรรีไฟด์ไฮโดรไลซิสลิกนิน (Hydrolysis lignin) ที่อุณหภูมิ 225 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 และ 60 นาที พบว่าเวลาที่ใช้ในกระบวนการไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวข้างต้นพบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการมีค่าอยู่ในช่วง 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส โดยมีค่าสูงขึ้นเป็นขั้นที่เท่าๆ กัน โดยมีการเพิ่มขึ้น 20 ถึง 25 องศาเซลเซียส ต่อเงื่อนไขการทดลอง ส่วนเวลาที่ใช้ในปฏิกิริยา พบว่ามีการศึกษาอยู่ในช่วง 20 ถึง 60 นาที โดยความยาวนานของเวลาที่ใช้มากกว่า 40 นาที จะไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการปรับปรุงสมบัติของชีวมวลชี้อยู่ไม่ส่นจากเศษเหลือจากการผลิตเฟอร์นิเจอร์เพื่อเพิ่มมูลค่าโดยการปรับปรุงสมบัติด้านเชื้อเพลิงได้โดยใช้กระบวนการทอรรีแฟกชันภายใต้สภาวะจำกัดออกซิเจนที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิงแข็ง ได้แก่ ความชื้น เถ้า ผลได้เชิงมวล ค่าความร้อนสูง องค์ประกอบแบบละเอียด อัตราส่วนอะตอม และหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ในชีวมวลดิบและชีวมวลทอรรีไฟด์ เพื่อเป็นองค์ความรู้ด้านการพัฒนาศักยภาพเชื้อเพลิงชีวมวลและสนับสนุนการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลของประเทศ ซึ่งช่วยลดมลภาวะสิ่งแวดล้อมและลดการปลดปล่อยมลพิษจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัสดุ

ชีวมวลที่ใช้ในการวิจัย คือ ชี้อยู่ยไม้สนไม่วะบุนสายพันธุ์ จากโรงงานเฟอร์นิเจอร์ใน กรุงเทพมหานคร ซึ่งขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเริ่มต้นจากนำชี้อยู่ยไม้สนมาลดความชื้นด้วยแสงอาทิตย์แบบธรรมชาติ จากนั้นลดขนาดของชีวมวลด้วยเครื่องบดละเอียด รุ่น HC-800Y ผลิตโดยบริษัท Wuyi Haina Electric Appliance จำกัด ประเทศจีน และร่อนแยกด้วยตะแกรงขนาด 18 เมช (Mesh) ผลิตโดยบริษัท Gilson จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร (Peng et al., 2012) แล้วบรรจุใส่ถุงกันความชื้นเตรียมไว้สำหรับการทดลองและวิเคราะห์ต่อไป โดยสมบัติทางเคมีและค่าความร้อนของชี้อยู่ยไม้สนดิบ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางเคมีและค่าความร้อนของชี้อยู่ยไม้สนดิบก่อนปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน

สมบัติ	ค่าความร้อนของชี้อยู่ยไม้สนดิบ
Ash (% , dry basis)	0.12±0.00
Moisture (% , as received)	8.39±0.07
HHV (MJ/kg)	19.64±0.06
Ultimate analysis (%wt. db)	
C	53.77±0.22
H	6.96±0.02
N	0.28±0.03
O*	38.87±0.16

* ได้จากการคำนวณผลต่างของ $100 - (\%C + \%H + \%N + \%Ash)$

2. การปรับปรุงสมบัติของชี้อยู่ยไม้สนด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน

การวิจัยนี้ใช้รูปแบบการวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design) มีจำนวน 4 ชุดการทดลองๆ ละ 2 ซ้ำ ชุดที่ 1 คือ ชีวมวลดิบซึ่งเป็นชุดควบคุม และชุดที่ 2 3 และ 4 คือ ชุดที่ปรับปรุงสมบัติของชี้อยู่ยไม้สนด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มวลของชี้อยู่ยไม้สนดิบที่ใช้ในแต่ละครั้งที่ทำการทดสอบ คือ 20 กรัม กระบวนการปรับปรุงเริ่มจากการชั่งน้ำหนักชีวมวลให้ได้ปริมาณตามที่กำหนด จากนั้นนำตัวอย่างใส่ในชุดปฏิกรณ์สแตนเลสแล้วนำเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูงยี่ห้อ Nabertherm รุ่น LT series ป้อนก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที จากนั้นปรับตั้ง

อุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนคงที่แก่วัสดุไม้สน 250 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ปลอยให้ชีวมวลเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิสภาพแวดล้อม นำผลิตภัณฑ์ออกจากเตาเผาโดยเทใส่ถุงกันความชื้นและชั่งผลิตภัณฑ์ทันที ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง แล้วเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลองเป็น 275 และ 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3. การวิเคราะห์สมบัติของชีเลื่อยไม้สนและชีเลื่อยไม้สนทอร์รีไฟต์

เพื่อศึกษาสมบัติด้านเชื้อเพลิงของชีเลื่อยไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชัน จึงได้พิจารณาทดสอบและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

3.1 ผลได้เชิงมวล (Mass yield)

ชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้ภายหลังผ่านการปรับปรุงด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชัน และคำนวณร้อยละผลได้เชิงมวล (Acharya & Dutta, 2016) ดังสมการที่ 1

3.2 ความชื้น (Moisture)

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM E871-82 (Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels) ทำได้โดยบรรจุตัวอย่างลงในครุชิลเปิดประมาณ 1 กรัม นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำครุชิลเปิดออกมาวางไว้ให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ 1 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนัก แล้วนำไปอบซ้ำอีกครั้ง จนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่หรือลดน้อยกว่า 0.5 มิลลิกรัม คำนวณหาปริมาณความชื้นของตัวอย่าง ดังสมการที่ 2

3.3 ปริมาณเถ้า (Ash)

การวิเคราะห์ปริมาณเถ้าอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 3174 (Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal) โดยเผาถ้วยกระเบื้องในเตาเผาอุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นในภาชนะที่ใส่เม็ดดูดความชื้น และชั่งน้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง แล้วชั่งชีวมวลที่บดละเอียดน้ำหนัก 1 กรัม (± 0.5 มิลลิกรัม) ใส่ลงในถ้วยกระเบื้อง จากนั้นนำถ้วยกระเบื้องพร้อมตัวอย่างเผาในเตาอุณหภูมิสูง โดยให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จากนั้นอุณหภูมิห้องถึง 500 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 1 ชั่วโมง และให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 750 องศาเซลเซียส ภายในชั่วโมงที่ 2 จากนั้นเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ต่อไปอีก 2 ชั่วโมง นำถ้วยกระเบื้องออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในภาชนะที่ใส่เม็ดดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักแน่นอนและคำนวณหาปริมาณเถ้า ดังสมการที่ 3

3.4 องค์ประกอบแบบละเอียด (Ultimate analysis)

เป็นการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในชีเลื่อยไม้สน และชีเลื่อยไม้สนทอร์รีไฟต์ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน โดยใช้เครื่อง CHNS/O analyzer, flash 2000, Thermoscientific, Italy

3.5 อัตราส่วนอะตอม (Atomic ratio)

นำร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียด มาทำการคำนวณสัดส่วน ดังสมการที่ 4

3.6 ค่าความร้อน (Heating Value)

ค่าความร้อน หมายถึง ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ สามารถวิเคราะห์ได้โดยตรงด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์หรือใช้สมการเอ็มไพริคัลที่ได้รับการเผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ ในงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงสมการคำนวณค่าความร้อนของ loelovich (2016) ดังสมการที่ 5 ค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณ คือ ร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียด

$$\text{Solid yield (\%)} = \left(\frac{m_{\text{tor}}}{m_{\text{raw}}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Moisture content (\%)} = \left(\frac{m_{\text{dry}} - m_{\text{wet}}}{m_{\text{dry}}} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Ash (\%)} = \left(\frac{m_{\text{crucible+ash}} - m_{\text{crucible}}}{m_{\text{crucible+sample}} - m_{\text{crucible}}} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$\text{O / C molar ratio} = \frac{\left(\frac{\%O}{15.999} \right)}{\left(\frac{\%C}{12.0107} \right)}, \quad \text{H / C molar ratio} = \frac{\left(\frac{\%H}{1.0078} \right)}{\left(\frac{\%C}{12.0107} \right)} \quad (4)$$

$$\text{HHV (MJ / kg)} = \frac{5.22C^2 - 319C - 1647H + 38.6CH + 133N + 21028}{1000} \quad (5)$$

m_{raw}	หมายถึง	มวลของชีวมวลชีเลื่อยไม้สน (กรัม)
m_{tor}	หมายถึง	มวลของชีเลื่อยไม้สนทอร์รีไฟด์ (กรัม)
m_{dry}	หมายถึง	มวลของชีเลื่อยไม้สนดิบก่อนอบ (กรัม)
m_{wet}	หมายถึง	มวลของชีเลื่อยไม้สนดิบหลังอบ (กรัม)
$m_{\text{crucible+sample}}$	หมายถึง	มวลของชีเลื่อยไม้สนดิบและถ้วยกระเบื้องหลังเผา (กรัม)
$m_{\text{crucible+ash}}$	หมายถึง	มวลของถ้ำและถ้วยกระเบื้องหลังเผา (กรัม)

m _{crucible}	หมายถึง	มวลถ้วยกระเบื้องหลังเผา (กรัม)
C H N และ O	หมายถึง	ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง (wt.%, dry basis) ของคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน

3.7 หมู่ฟังก์ชัน (Functional Groups)

ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะทางเคมีบนพื้นผิวของซีลี้อยไม้สนดิบเปรียบเทียบกับซีลี้อยไม้สนทอร์รีไฟต์ โดยอาศัยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR) เนื่องจากชีวมวลตัวอย่างเป็นของแข็ง จึงเลือกใช้เทคนิค KBr-pellet ในการเตรียมตัวอย่าง ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ทำได้โดยอบโปตัสเซียมโบรไมด์ (KBr) ที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นออกจากสาร หลังจากนั้นบดผสมกับผงชีวมวลและนำไปอัดด้วยเครื่องอัดจะได้แผ่นวงกลมบางใส นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR Spectrometer รุ่น Perkin Elmer, Spectrum One ในช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ 4000 ถึง 400 ต่อเซนติเมตร ผลวิเคราะห์แสดงในรูปของร้อยละการส่งผ่าน (Transmittance)

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

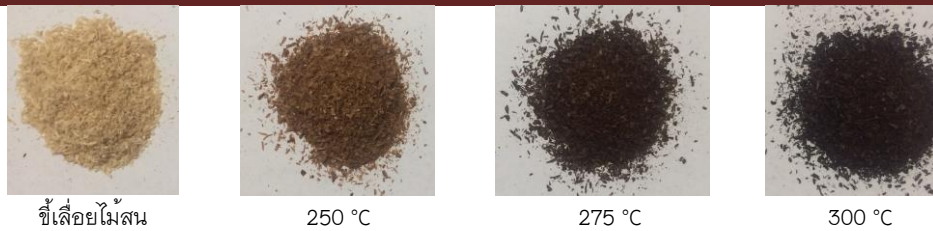
ผลวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียดและค่าความร้อนจะถูกนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ ANOVA โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของแต่ละชุดการทดลองด้วยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิทอร์รีแฟกชันต่อสมบัติของซีลี้อยไม้สนที่ปรับปรุงด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส โดยวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์จากค่าความชื้น ผลได้เชิงมวล เถ้า องค์ประกอบแบบละเอียด อัตราส่วนอะตอมค่าความร้อน และหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลทอร์รีไฟต์

เมื่อปรับปรุงชีวมวลซีลี้อยไม้สนด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชัน พบว่า เกิดการเปลี่ยนสีของซีลี้อยไม้สนตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทอร์รีไฟต์ โดยสีของซีลี้อยไม้สน คือ สีเหลืองอ่อนเมื่อผ่านการปรับปรุงโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส ทำให้มีสีเข้มขึ้นเป็นสีน้ำตาลอ่อน น้ำตาลเข้ม และสีดำ ตามลำดับ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 สีของซีเลื่อยไม้สนภายหลังการปรับปรุงด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน

2. ผลการศึกษาผลได้เชิงมวล

ผลการศึกษาผลได้เชิงมวลของซีเลื่อยไม้สน พบว่า มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ นั่นคือ ที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งร้อยละ 86.35 ± 0.49 77.10 ± 0.14 และ 62.63 ± 0.32 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทอรรีไฟด์ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ผลได้เชิงมวล แก๊ส ความชื้น และค่าความร้อนของซีเลื่อยไม้สนดิบ และซีเลื่อยไม้สนทอรรีไฟด์

เงื่อนไข การทดลอง	ผลได้เชิงมวล (ร้อยละ)	ปริมาณแก๊ส (ร้อยละ)	ความชื้น (ร้อยละ)	ค่าความร้อนสูง (เมกะจูลต่อ กิโลกรัม)
ซีเลื่อยไม้สนดิบ	–	$0.12^d \pm 0.00$	$8.39^a \pm 0.07$	$19.64^d \pm 0.06$
250 °C	$86.35^a \pm 0.49$	$0.15^c \pm 0.02$	$1.95^b \pm 0.06$	$21.19^c \pm 0.12$
275 °C	$77.10^b \pm 0.14$	$0.20^b \pm 0.02$	$1.73^c \pm 0.08$	$22.32^b \pm 0.02$
300 °C	$62.63^c \pm 0.32$	$0.39^a \pm 0.07$	$1.59^d \pm 0.01$	$24.54^a \pm 0.08$

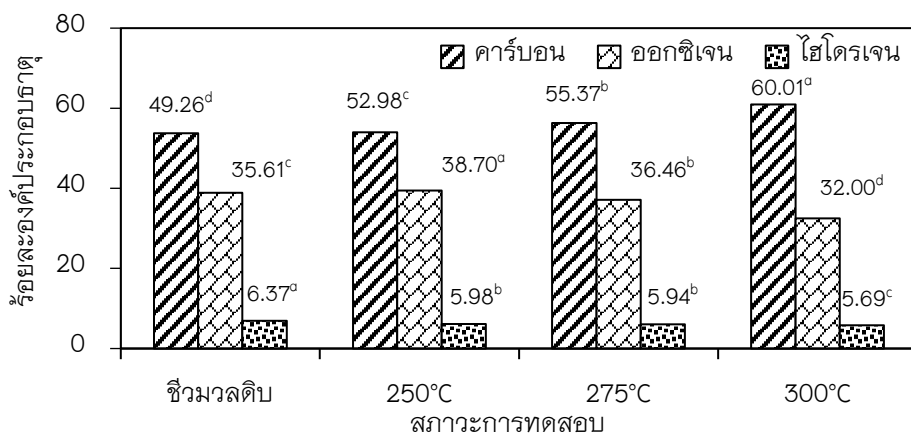
^{a-d} หมายถึง อักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวดิ่ง ($p \leq 0.05$)

3. ผลการศึกษาปริมาณแก๊สและความชื้น

จากการวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้นของชีวมวลซีเลื่อยไม้สนดิบ พบว่า มีค่าร้อยละ 8.39 ± 0.07 เมื่อทำการทอรรีแฟกชันชีวมวลที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่า ความชื้นของชีวมวลทอรรีไฟด์มีค่าลดลงเป็นร้อยละ 1.95 ± 0.06 1.73 ± 0.08 และ 1.59 ± 0.01 ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณแก๊สมีค่าสูงขึ้น โดยปริมาณแก๊สของชีวมวลซีเลื่อยไม้สนดิบมีค่าร้อยละ 0.12 ± 0.00 เมื่อชีวมวลซีเลื่อยไม้สนดิบถูกทอรรีไฟด์ ส่งผลให้ปริมาณแก๊สมีค่าสูงขึ้นเป็นร้อยละ 0.15 ± 0.02 0.20 ± 0.02 และ 0.39 ± 0.07 ตามลำดับ

4. ผลการศึกษาองค์ประกอบแบบละเอียด

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียดของชีวมวลชี้เลื่อยไม้สนดิบและชีวมวลชี้เลื่อยไม้สนทอร์รีไฟด์ ดังภาพที่ 2 พบว่า ชีวมวลชี้เลื่อยไม้สนมีปริมาณคาร์บอน ร้อยละ 49.26 ± 0.16 เมื่อทอร์รีไฟด์ที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 52.98 ± 0.20 55.37 ± 0.05 และ 60.01 ± 0.08 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ชีวมวลชี้เลื่อยไม้สนมีปริมาณออกซิเจน ร้อยละ 35.61 ± 0.18 เมื่อผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส ส่งผลให้มีค่าลดลงเป็นร้อยละ 38.70 ± 0.33 36.46 ± 0.11 และ 32.00 ± 0.04 ตามลำดับ ส่วนปริมาณไฮโดรเจน พบว่า มีค่าลดลงจากร้อยละ 6.37 ± 0.02 เป็นร้อยละ 5.98 ± 0.05 5.94 ± 0.01 และ 5.69 ± 0.06 ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณไนโตรเจนของชีวมวลชี้เลื่อยไม้สนและชีวมวลชี้เลื่อยไม้สนทอร์รีไฟด์มีค่าร้อยละเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.26 ± 0.03 ถึง 0.32 ± 0.02



ภาพที่ 2 ปริมาณองค์ประกอบธาตุของชีวมวลชี้เลื่อยไม้สนกับอุณหภูมิทอร์รีแฟกชัน

- หมายเหตุ 1. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันในแต่ละองค์ประกอบธาตุ หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ตามวิธี DMRT
2. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแต่ละองค์ประกอบธาตุ หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ตามวิธี DMRT

5. อัตราส่วนอะตอม

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) และไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) สามารถใช้เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางเชื้อเพลิงของชีวมวลและชีวมวล

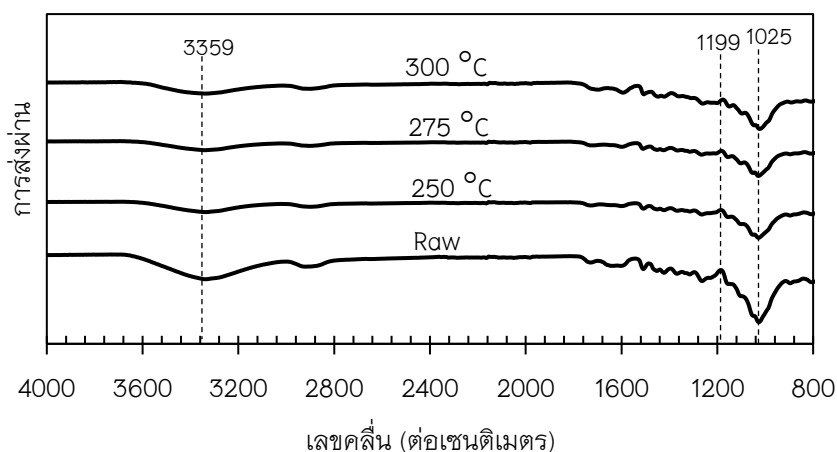
ทอรรีไฟต์ที่อุณหภูมิทอรรีไฟต์ต่างกัน ได้ ผลการวิจัยพบว่า อัตราส่วนอะตอม O/C และ H/C ของชีวมวลชีเลื่อยไม้สนดิบมีค่าเป็น 1.54 และ 0.54 ตามลำดับ เมื่อทอรรีไฟต์ที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่า อัตราส่วน O/C มีค่าลดลงเป็น 1.35 1.28 และ 1.13 และ อัตราส่วน H/C มีค่าลดลงเป็น 0.55 0.49 และ 0.40 ตามลำดับ

6. ผลการศึกษาค่าความร้อน

ค่าความร้อนสูงของชีเลื่อยไม้สนที่ใช้ในงานวิจัยมีค่าเฉลี่ยเป็น 19.64 ± 0.06 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม สอดคล้องกับค่าความร้อนของไม้สน Patula ที่มีค่า 19.84 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม (Ramos–Carmona et al., 2017) ซึ่งเมื่อทอรรีไฟต์ที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงของชีเลื่อยไม้สนทอรรีไฟต์มีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 21.19 ± 0.12 22.32 ± 0.02 และ 24.54 ± 0.08 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 และสอดคล้องกับผลการทอรรีไฟต์ไม้สนสายพันธุ์อเมริกาเหนือ ที่ทอรรีไฟต์ภายใต้ อุณหภูมิ 290 เป็นเวลา 30 นาที ทำให้ค่าความร้อนของไม้สนดิบมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 20.21 เป็น 23.49 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม (McNamee et al., 2016)

7. ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของชีวมวล

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ที่อยู่ในชีวมวลที่สัมพันธ์กับ อุณหภูมิที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพ ดังภาพที่ 3 พบว่า ยอดกราฟของหมู่ (O–H) และ (C–O) ซึ่งอยู่ในช่วงเลขคลื่น 3200–3600 ต่อเซนติเมตร และ 1000 ต่อเซนติเมตร เริ่มลดต่ำลงเมื่ออุณหภูมิ ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพมีค่าสูงขึ้นเป็น 250 275 องศาเซลเซียส และปรากฏที่ 1,199 ต่อ เซนติเมตร และ 1,025 ต่อเซนติเมตร ตรงกับการสั่นของพันธะในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส โดยพบว่าความเข้มของพีคมีค่าลดลงในทุกอุณหภูมิที่ใช้ทอรรีไฟต์



ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ในชีเลื่อยไม้สนทอรรีไฟต์

อภิปรายผล

ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลที่เลี้ยงไม้สนดิบภายหลังปรับปรุงด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน พบว่า เกิดการเปลี่ยนสีของชีเลี้ยงไม้สนดิบตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทอรรีแฟกต์ จากสีเหลืองอ่อน เป็นสีน้ำตาลอ่อน น้ำตาลเข้ม และสีดำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของการทอรรีแฟกต์ชีวมวลชนิดอื่น คือ ชานอ้อย ข้าวโพด และฟางข้าว (Dhakate et al., 2019; Granados et al., 2017; Tumuluru, 2015) โดยทั่วไปชีวมวลประเภทไม้จะมีองค์ประกอบเป็นเซลลูโลสประมาณร้อยละ 40–45 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 25–35 และลิกนินร้อยละ 15–30 โดยน้ำหนักแห้งอีกร้อยละ 10 เป็นองค์ประกอบอื่นๆ (กรวิพัชญ์, 2558) ซึ่งเซลลูโลส (Cellulose) มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคส (Glucose) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) เป็นหมู่หลัก มีสูตรโมเลกุลคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ ส่วนเฮมิเซลลูโลสนั้นเป็นส่วนหนึ่งของผนังเซลล์ของพืชเช่นกัน แต่เป็นสารโพลีเมอร์ของพวก D-ไซโลส ซึ่งมีแขนข้างเป็นน้ำตาลอะราบินอสหรือน้ำตาลชนิดอื่นๆ และสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของชีวมวล คือ ลิกนิน (Lignin) เป็นสารประกอบระหว่างคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{10}H_{12}O_4$ มีปริมาณรองลงมาจากเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลเหล่านี้สามารถเกิดการสลายตัวได้เมื่อได้รับความร้อนที่สูงมากพอ โดยเฮมิเซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ คือ 200 ถึง 400 องศาเซลเซียส เซลลูโลสจะสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 275 ถึง 430 องศาเซลเซียส และลิกนินสลายตัวในช่วงที่กว้าง นั่นคือ 127 ถึง 900 องศาเซลเซียส (Yang, 2007) ดังนั้นเมื่อชีวมวลได้รับความร้อนและเกิดจากการสลายตัวทางความร้อนของสามองค์ประกอบหลัก ส่งผลให้เกิดการก่อตัวของไฮดรอกซิล คาร์บอนิล เมทอกซิล และสารประกอบฟีนอลในระหว่างการเปลี่ยนสภาพด้วยความร้อน (Oyebode & Ogunsuyi, 2021) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของชีวมวลทอรรีแฟกต์ สีของชีวมวลทอรรีแฟกต์สามารถบ่งบอกสมบัติทางเชื้อเพลิงได้ เช่น การที่ชีวมวลมีสีดำนัน หมายความว่ามีความได้แก้มากเป็นองค์ประกอบอยู่มาก (Singh et al., 2020)

ผลได้เชิงมวลของชีเลี้ยงไม้สน พบว่า มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ โดยลดลงต่ำที่สุดเป็นร้อยละ 62.63 ± 0.32 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของรามอส-คาร์โมนา และคณะ (Ramos-Carmona et al., 2017) ที่ปรับปรุงคุณภาพไม้สนด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แล้วพบว่า มีค่าผลได้เชิงมวลร้อยละ 67.75 เหตุที่ผลได้เชิงมวลที่เป็นของแข็ง (ถ่าน) มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากความร้อนที่ใช้ในการปรับสภาพทำให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ในชีวมวล ซึ่งมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เนื่องจากความซับซ้อนของ

โครงสร้างที่ต่างกันทำให้มีความสามารถในการทนต่อการปรับสภาพด้วยความร้อนที่แตกต่างกัน ในช่วงอุณหภูมิ 250–275 องศาเซลเซียส พบการลดลงของผลได้เชิงมวลร้อยละ 9.25 ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสในช่วง 200–400 องศาเซลเซียส แต่พบการลดลงของผลได้เชิงมวลที่มากขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 275–300 องศาเซลเซียส คือ ลดลงร้อยละ 14.47 เนื่องจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสร่วมกับเซลลูโลส ซึ่งเซลลูโลสจะสลายตัวในช่วง 275–430 องศาเซลเซียส (Kongto et al., 2016) การสูญเสียของผลิตภัณฑ์ของแข็งมีมากกว่าในช่วงระหว่าง 200–250 องศาเซลเซียส อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส การระเหยของน้ำและสารระเหยบางส่วนออกจากเชื้อเพลิงชีวมวล

ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ของเชื้อเพลิง คือ เถ้า โดยภายหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชัน ส่งผลให้ปริมาณเถ้ามีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิทอร์รีไฟด์จากร้อยละ 0.12 ± 0.00 เป็นร้อยละ 0.39 ± 0.07 ที่อุณหภูมิทอร์รีไฟด์ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ แมกนามี และคณะ (McNamee et al., 2016) ที่ทอร์รีไฟด์ไม้สนในช่วงอุณหภูมิ 250–290 องศาเซลเซียส แล้วพบว่า ร้อยละปริมาณเถ้ามีค่าในช่วง 0.45–0.55 เชื้อเพลิงที่มีปริมาณเถ้าต่ำ หมายถึง เชื้อเพลิงนั้นมีองค์ประกอบที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ปนอยู่น้อยจึงเป็นสมบัติที่ดีของเชื้อเพลิง ประเภทไม้เมื่อเทียบกับชีวมวลประเภทที่ไม่ใช่ไม้ เช่น เปลือกมะพร้าว ต้นกล้วย เปลือกผลสับปะรด มีปริมาณเถ้าร้อยละ 3.95 19.0 18.33 ตามลำดับ (Adeyi, 2010; Islam et al., 2019; Kethobile, Ketlogetswe & Gandure, 2020) นอกจากนี้ยังพบความชื้นของชีวมวลทอร์รีไฟด์มีค่าลดลงตามอุณหภูมิทอร์รีไฟด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้องค์ประกอบในกลุ่มที่เผาไหม้ได้มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียดของชีวมวลชีเลื่อยไม้สนและชีวมวลชีเลื่อยไม้สนทอร์รีไฟด์ พบว่า ปริมาณคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิทอร์รีไฟด์ที่สูงขึ้น เนื่องจากการสูญเสียสารระเหย (Volatile matter) ทำให้สัดส่วนของปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น แต่ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนมีค่าลดลง ซึ่งการลดลงของปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนส่งผลต่อการก่อตัวของไอน้ำและควันที่ลดลงเมื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากการสูญเสียสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ในระหว่างกระบวนการทอร์รีแฟกชัน (Oyebode & Ogunsuyi, 2021)

อัตราส่วนอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) และไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) สามารถใช้เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางเชื้อเพลิงของชีวมวลและชีวมวลทอร์รีไฟด์ที่อุณหภูมิทอร์รีแฟกชันต่างๆ กับถ่านหิน ผลการวิจัย พบว่า อัตราส่วนอะตอม O/C และ H/C ของชีวมวลชีเลื่อยไม้สนเมื่อทอร์รีไฟด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีค่า 1.13 และ 0.40 ตามลำดับ นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิในกระบวนการทอร์รีแฟกชันมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ปริมาณคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ออกซิเจนและไฮโดรเจนมีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียดที่พบการลดลงขององค์ประกอบธาตุดังกล่าวข้างต้น เนื่องจากการสลายตัวของอินทรีย์สารใน

ชีวมวลไปเป็นก๊าซที่ควบแน่นไม่ได้ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซที่ควบแน่นได้ ได้แก่ ไอน้ำ และสารระเหย ประเภทแอลกอฮอล์ ($-\text{CH}_3\text{OH}$) กรดคาร์บอกซิลิก (HCOOH , CH_3COOH) (Ramos–Carmona et al., 2017) ส่งผลให้สัดส่วนอะตอมทั้ง O/C และ H/C มีค่าลดลง และพบว่า มีสมบัติเข้าใกล้ถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) ซึ่งมีอัตราส่วน O/C และ H/C เป็น 0.8–1.3 และ 0.2–0.38 ตามลำดับ (Pala et al., 2014)

ค่าความร้อนสูงของชี้เลื่อยไม้สนมีค่า 19.64 ± 0.06 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อทำการทอร์รีไฟด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงของชี้เลื่อยไม้สนทอร์รีไฟด์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 24.54 ± 0.08 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม สอดคล้องกับผลการทอร์รีไฟด์ไม้สนสายพันธุ์อเมริกาเหนือที่ทอร์รีไฟด์ภายใต้อุณหภูมิ 290 เป็นเวลา 30 นาที ทำให้ค่าความร้อนของไม้สนดิบมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 20.21 เป็น 23.49 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม (McNamee et al., 2016) ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงยิ่งสูงแสดงถึงคุณภาพที่ดีของเชื้อเพลิง สังเกตได้ว่าผลกระทบของอุณหภูมิทอร์รีแฟกชันส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนในลักษณะของฟังก์ชันที่แปรผันตรง เนื่องจากกระบวนการทอร์รีแฟกชันทำให้พันธะ H–C และ O–C ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีพลังงานต่ำภายในชีวมวลนั้นถูกทำลายด้วยความร้อนและเกิดการแตกตัวของอินทรีย์สารไปเป็นก๊าซ ทำให้ชีวมวลทอร์รีไฟด์ที่เหลืออยู่ล้วนเป็นของแข็งที่เกาะเกี่ยวกันด้วยพันธะ C–C ซึ่งเป็นพันธะที่มีพลังงานสูงจึงส่งผลให้ค่าความร้อนสูงของชีวมวลทอร์รีไฟด์มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ (Onsri & Tippayawong, 2018)

เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอร์รีแฟกชันมี 3 ประเภท คือ ของแข็งที่เรียกว่า ไบโอชาร์ (Biochar) สารระเหยที่ควบแน่นได้เป็นของเหลว (Liquid condensable volatiles) และสารระเหยที่มีสถานะเป็นก๊าซ ดังนั้นการนำผลิตภัณฑ์จากกระบวนการทอร์รีแฟกชันไปใช้ประโยชน์และการประยุกต์ใช้งานจึงมีความแตกต่างกัน การใช้ประโยชน์ผลิตภัณฑ์หลักที่เป็นของแข็งหรือไบโอชาร์ เช่น การใช้เผาไหม้ร่วมกับถ่านหินในโรงไฟฟ้าพลังความร้อน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติด้านเชื้อเพลิงใกล้เคียงหรือเทียบเท่าถ่านหินเกรดต่ำเป็นอีกหนึ่งทางเลือกของแหล่งพลังงานทดแทน อีกทั้งสามารถนำมาอัดเม็ดเพื่อเพิ่มความหนาแน่นบัลค์ (Bulk density) และความหนาแน่นพลังงาน นอกจากนี้ไบโอชาร์สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินได้ (Soil Amendment) และช่วยในการกักเก็บคาร์บอน (Carbon Sequestration) และการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนของผลิตภัณฑ์ในรูปของเหลวเกิดจากสารระเหยที่ควบแน่นได้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารป้องกันศัตรูพืช ยิ่งกว่านั้นการเปลี่ยนสภาพทางชีวเคมี (Biochemical conversion process) ของผลิตภัณฑ์เหลวเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์อาจเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการเพิ่มมูลค่า เช่น การนำผลิตภัณฑ์เหลวไปหมักทำให้เกิดการย่อยสลายของสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน (Anaerobic digestion) ได้เป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งประกอบด้วย ก๊าซมีเทน (CH_4)

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ใช้เป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงต่างๆ เช่น การหุงต้ม เชื้อเพลิงรถยนต์ เชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรม เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ก๊าซและของเหลวมีสัดส่วนพลังงานร้อยละ 15–20 ของพลังงานทั้งหมดจากชีวมวล (Niu et al., 2019) ซึ่งก๊าซที่ได้อาจใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตความร้อนเพื่อใช้อบแห้งชีวมวลดิบหรือใช้เผาไหม้ให้ความร้อนกับปฏิกิริยาในกระบวนการทอรีแฟกชัน

สรุปผลการวิจัย

การทอรีไฟด์ชีเลื่อยไม้สนที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่า ส่งผลต่อสีของผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ มีสีเข้มขึ้นจากน้ำตาลอ่อน เป็นน้ำตาลเข้มและดำ ผลได้เชิงมวลมีค่าลดลงต่ำที่สุดเป็นร้อยละ 62.63 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ส่วนปริมาณถ่านและคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนมีลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความร้อนสูงของชีวมวลไม้สนดิบที่มีค่าความร้อนเป็น 19.64 ± 0.06 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม มีค่าสูงขึ้นอยู่ในช่วง 21.19 ± 0.12 ถึง 24.54 ± 0.08 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม นอกจากนี้หมู่ (O-H) ลดลงอย่างเห็นได้ชัดทำให้ชีวมวลทอรีไฟด์มีความสามารถในการดูดความชื้นได้ต่ำลง ซึ่งช่วยลดการสลายตัวทางชีวภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลได้ ดังนั้นชีเลื่อยไม้สนทอรีไฟด์จึงเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหินเกรดต่ำ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่สนับสนุนห้องปฏิบัติการในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กรวิพัชญ์ ประพันธ์ตร. (2558). ผลของการบำบัดเบื้องต้นของเศษการตัดแต่งกิ่งไม้ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และถ่านลอยชีวมวลต่อการแปรเปลี่ยนคาร์บอนไนโตรเจนและของแข็งระเหยในกระบวนการผลิตปุ๋ยหมัก. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.
- ณัฐพงษ์ ประภากร. (2558). การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลคุณภาพสูงโดยใช้กระบวนการทอรีแฟกชัน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร.

- ณัฐรัตน์ ฉัตรวิบูลกุล. (2560). การปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันด้วยเตาเผาแบบหมุน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยศิลปากร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน.
- นคร วรสุวรรณรักษ์. (2554). การศึกษาสมบัติเชิงเคมีความร้อนของวัสดุชีวมวลที่ได้ในประเทศไทยเพื่อการแปรรูปเป็นพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ (รายงานการวิจัย). กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- นราธร มหรรพตพงศ์, และยุวรัตน์ เงินเย็น. (2563). การทอรีแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากของเสียโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล. *วารสารวิจัย มช. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, 20(1), 65–75.
- สุรเศรษฐ์ พาพันธ์, พิเชฐ นิลดวงดี, และเอกวุฒิ แสนคำวงษ์. (2562). คุณสมบัติการเผาไหม้ของเปลือกทุเรียนทางปาล์ม และทางตาลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน. ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33*. อุตรธานี: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- อรอริน คุ่มศักดิ์, วีรพงษ์ วัฒนมน้อย, และนคร วรสุวรรณรักษ์. (2554). การทอรีแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากของเสียโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 34(4), 341–355.
- Acharya, B., & Animesh, D. (2016). Fuel property enhancement of lignocellulosic and nonlignocellulosic biomass through torrefaction. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 6(2), 139–149.
- Adeyi, O. (2010). Proximate composition of some agricultural wastes in Nigeria and their potential use in activated carbon production. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 14(1), 55–58.
- Chi-Leung, S., & Thomas, L.E. (2018). FTIR-based models for assessment of mass yield and biofuel properties of torrefied wood. *Wood Science and Technology*, 52(1), 209–227.
- Demirbas, A. (2007). Effects of moisture and hydrogen content on the heating value of fuels. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 29(7), 649–655.
- Dhakate, S.R., Pathak, A.K., Prateek, J., Mandeep, S., Singh, B.P., Subhedar, K. M., Sharda, S.S., & Seth, R.K. (2019). Rice straw biomass to high energy yield biocoal by torrefaction: indian perspective. *Current Science*, 116(5), 831–838.
- Energy789. (2021). **Wood Sawdust**. Retrieved August, 8, 2021, from <https://energy789.com/en/articles/90848-wood-sawdust>.
- Granados, D.A., Ruiz, R.A., Vega, L.Y., & Chejne, F. (2017). Study of reactivity reduction in sugarcane bagasse as consequence of a torrefaction process. *Energy* 139, 818–827.
- loelovich, M. (2016). Comparison of methods for calculating the combustion heat of biopolymers and vegetable biomass. *ChemXpress*, 9(6), 107.
- Islam, M., Atikul, M., Ali, A., Sharif, H.L., Md., A.A., & Md., A.I. (2019). Characterization of solid biofuel produced from banana stalk via hydrothermal carbonization. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 9(4), 651–658.

- Kethobile, E., Clever, K., & Jerekias, G. (2020). Characterisation of the non-oil jatropha biomass material for use as a source of solid fuel. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 10(4), 1251–1267.
- Kongto, P., Palamanit, A., Tippayawong, N., & Chaiprapat, S. (2563). Biomass torrefaction technology for producing high quality solid biofuels. **Engineering Journal Chiang Mai University**, 27(2), 121–150.
- Lowden, L.A., & Terence, R.H. (2013). Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. **Fire Science Reviews**, 2(1), 1–19.
- Mamvura, T.A., & Danha, G. (2020). Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production. **Heliyon**, 6(3), e03531.
- Manouchehrinejad, M., Van Giesen, I., & Mani, S. (2018). Grindability of torrefied wood chips and wood pellets. **Fuel Processing Technology**, 182, 45–55.
- McNamee, P., Adams, P.W.R., McManus, M.C., Dooley, B., Darvell, L.I., Williams, A., & Jones, J.M. (2016). An Assessment of the torrefaction of north american pine and life cycle greenhouse gas emissions. **Energy Conversion and Management**, 113, 177–188.
- Niu, Y., Lv, Y., Lei, Y., Liu, S., Liang, Y., Wang, D., & Hui, S. (2019). Biomass torrefaction: properties, applications, challenges, and economy. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, 115, 109395.
- Onsri, T., & Tippayawong, N. (2018). Overview of biomass upgrading by torrefaction process. **Engineering Journal Chiang Mai University**, 25(1), 11–33.
- Oyebode, W.A., & Helen, O. (2021). Impact of torrefaction process temperature on the energy content and chemical composition of stool tree (*alstonia congenisis engl*) woody biomass. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, 4, 100115.
- Pala, M., Ismail, C.K., Hasan, B.B., & Jale, Y. (2014). Hydrothermal carbonization and torrefaction of grape pomace: a comparative evaluation. **Bioresource Technology**, 161, 255–262.
- Paraschiv, S., & Lizica, S.P. (2020). Trends of carbon dioxide (CO₂) emissions from fossil fuels combustion (coal, gas and oil) in the EU member states from 1960 to 2018. **Energy Reports**, 6, 237–42.
- Peng, J.H., Bi, H.T., Sokhansanj, S., & Lim, J.C. (2012). A study of particle size effect on biomass torrefaction and Densification. **Energy & Fuels**, 26(6), 3826–3839.
- Ramos–Carmona, S., Juan, F.P., Manuel, R.P., Rolando, B., & Manuel, G.P. (2017). Effect of torrefaction temperature on properties of patula pine. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, 19(1), 39–50.
- Singh, S., Jyoti, P.C., & Monoj, K.M. (2020). Torrefaction of woody biomass (*acacia nilotica*): investigation of fuel and flow properties to study its suitability as a good quality solid fuel. **Renewable Energy**, 153, 711–724.
- Sukiran, M.A., Wan Daud, W.M.A., Abnisa, F., Nasrin, A.B., Astimar, A.A., & Loh, S.K. (2021). Individual torrefaction parameter enhances characteristics of torrefied empty fruit bunches. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 11(2), 461–472.

- Telmo, C., & Lousada, J. (2011). The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood. **Biomass and Bioenergy**, **35**(5), 1663–1667.
- Trouvé, G., Brillard, A., Maryandyshev, P., Kehrli, D., Eseev, M., Lyubov, V., & Brilhac, J.F. (2021). Analyses of the impact of torrefaction processes on hydrolysis lignin samples through chemical and morphological investigations. **Biomass Conversion and Biorefinery**, **11**(5), 2123–2132.
- Tumuluru, J.S. (2015). Comparison of chemical composition and energy property of torrefied switchgrass and corn stover. **Frontiers in Energy Research**, **3**, 46.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D.H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, **86**, 1781–1788.
- Zhang, S., Hu, B., Zhang, L., & Xiong, Y. (2016). Effects of torrefaction on yield and quality of pyrolysis char and its application on preparation of activated carbon. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, **119**, 217–223.